

生命と地球 II

－ 総論として生命の多様性 －

佐藤 和弘[※]

先の論文（佐藤和弘『生命と地球』青森公立大学紀要第13巻1号）では、地球の歴史を40億年前まで遡り、主に生命の起源に対する仮説と細胞進化のメカニズムを論じた。続編となるこの論文では、約10億年前と推定される多細胞生物への進化、約6億年前に突如として達成された生命の多様性、そして約4億年前に起こった動植物の地上への進出、そして豊かな地上生態系の形成について議論する。その背景にある地球環境の目覚ましい変化、すなわち大気成分の変化、超大陸の形成と分裂、温暖化と寒冷化のサイクル、および5回にわたる生物の大絶滅についても述べる。最後に、600万年前の人類の出現と、現生人の祖先であるサピエンスの、異常ともいえる大繁栄の謎について考察する。

§ 1 はじめに

この論文は、先の論文（『生命と地球』、以下論文Iと引用）の続編として、生命の起源と進化に関する総論を試みたものであり、この分野に興味を持つ科学者一般を対象としている。現在の標準とされる理論を中心に議論を進めているが、随所に著者独自の視点を盛り込んである。先の論文Iでは、誕生後40億年間の地球の歴史、最初の生命の誕生、そして単細胞生物の進化を議論した。ここでは、もっぱら生命の普遍性に注目してきた。地球生命はシステムとして唯一であり、現在の多種多様な生物はすべて、その唯一の生命システムから進化した。普遍性があるのは当然である。この続編では、最近6億年間の生命の歴史へと議論を進める。この間に起こった特筆すべきできごとは、多細胞生物の出現と、それらの相次ぐ地上への進出である。現在の地球の姿につながる、われわれにとってなじみ深い地上生態系の形成である。まず、この6億年に起こったできごとを時系列的に列挙しよう。

多細胞生物への進化：10億年前に、多細胞体制をもつ生物が現れた。

生物の多様化：5億年前のカンブリア紀に、硬い殻をもつ多細胞生物が出現した。しかし、その後、5度にわたる大規模な絶滅（大絶滅）が起きている。

地上生態系の形成：約4億年前に、植物と菌類の祖先が、ついで節足動物や脊椎動物の祖先が上陸に成功した。

サピエンスの誕生：20万年前に、すぐれた脳をもつサピエンスが出現した。

§ 2 多細胞生物への進化

多細胞生物には、単細胞生物にはない、新しい次元の複雑さが生じる。すなわち、細胞分化と形態形成である。化石調査から、8億年前にはすでに多細胞生物（ぜん虫）が存在したことが明らかである。分子進化学の知見と合わせ、約10億年前に単細胞生物から多細胞生物への進化が起こったことは間違いない。地球規模での環境悪化が強い進化圧として働いたと推測される。7億年前と6億年前に、地球は全球凍結にさらされているが、これが多細胞生物の多様化をもたらしたと考えられている。

※青森公立大学教授

2.1 繰り返し起こった多細胞化

今では、数百種の生物のゲノムが解読され、遺伝子の比較が行われている。その結果、判明した事実は、多細胞化がさまざまな単細胞生物の系列から、それぞれ独立に起こったということである。動物と植物とは、それぞれ別々の単細胞生物から進化した。多細胞化は、何度も繰り返し起こっている。なかには多細胞から単細胞へと、退行進化した例もある。多細胞動物にもっとも近縁の単細胞生物は襟鞭毛虫である。また、多細胞植物にもっとも近縁な単細胞生物は緑藻類である。

現生の単細胞生物も、棲息環境が悪化すると集まって群体を形成する種がある。単細胞生物クラミドモナスの群体であるオオヒゲマワリはよく知られている。群体は細胞が周りにゼリー状の基質を分泌して接着性を高め、一群の細胞集団となって耐性を高める。この群体は簡単な操作でばらばらの単細胞に戻すことができる。真の意味での多細胞生物は、細胞間に強固な結合が形成されていて、細胞膜に連結器のような結合構造、あるいはベルト状の接着構造をもつ。細胞間の強固な接着を何らかの方法で解消できない限り、ばらばらの細胞に分けることは難しい。

群体を形成する細胞においても、個々の細胞は環境の差異を感知して遺伝子を発現し、分化をする。分化した細胞は内部構造、膜構造、形態などが変化する。分化した細胞による役割分担により、多細胞体制が形成される。このとき、多細胞生物の形態形成も進む。細胞分化を、そして結果的に生物の形態形成を促すシグナルを、モルフォゲンと呼ぶ。

多細胞化に不可欠なのは細胞間接着とシグナル伝達系の遺伝子である。分子系統学によれば、これらの遺伝子群は、多細胞化の直前に生まれたのではなく、約10億年間の単細胞生物の時代に、すでにそれらの祖先型が誕生していることが明らかになっている。その用途は細胞増殖関係であった。なお、ヒトの場合、遺伝子の約2割がシグナル伝達系のものである。

多細胞化のメリットは、生物としてのサイズ

を大型化できること、その結果として捕食されにくくなる。悪化した環境へ適応力が、単細胞のときより増大する。複雑な形態形成が可能になり、高度なシステムへ発展できるなどがある。デメリットとしては、ゲノムサイズの増大（複製に時間がかかり、繁殖戦略として不利）、発生や形態形成という複雑なプロセスが必要、さらに部分（サブシステム）の連携、協調、全体の統合のしくみなどの体制構築が新たに必要になる。こうした理由から、依然として単細胞で棲息する生物が多い。自然の厳しい淘汰に耐えて、多細胞化のデメリット克服に成功した生物が、現在の多様な生物種を形成している。

2.2 細胞性粘菌の形態形成

単細胞生物が集合して、あたかも一個の多細胞生物であるかのように振舞う例が、細胞性粘菌である。細胞性粘菌は、19世紀後半に発見された土壌微生物で、アメーバ状の生物である。粘菌は植物、動物どちらともつかず、生物世界の位置が長らく不明であったが、分子系統学の研究により、生物界での位置付けが判明した。まず、植物とその他が分岐、ついでその他から粘菌とその他が分岐、そして最後に、このその他から菌類と動物が分岐した。つまり、菌類であるキノコやカビ類は、植物よりも動物に近縁である。

餌が豊富な場合、粘菌はアメーバの姿で独立生活を行い、適時増殖する（増殖相）。ところが、餌のバクテリアがなくなると、飢餓を感知したアメーバがAMP分子を分泌し、それに他のアメーバが応答して集合する。その数は10万から50万個で、アメーバが集合する様子は「奔流」にたとえられる。アメーバは互い細胞を接着し、AMPの受容と分解のフィードバックによって脈打つように集合する。アメーバの集合が終わると中心部が角（つの）を作るように盛り上がる。その先端が倒れてナメクジ状になると、移動体が形成される。移動体の内部では、予定柄細胞と予定胞子細胞に分化が起こっている。分化を進めるのは、予定胞子細胞から分泌されるモルフォゲン（DIF）である。移動体の形態形成の役割

(オーガナイザー)を果たすのは予定柄細胞であり、移動方向を決め、光刺激で停止し、移動体は子実体形成へ進む。停止した移動体はテンガロン・ハット状に変形し、その突き出た先端部分を占める予定柄細胞の一部がリングを作る。リングを作る細胞はセルロースを分泌し、セルロースの鞘が伸張する。この鞘を通り、予定柄細胞が柄細胞に分化を始める。柄細胞はセルロース性の堅い細胞壁と、内部に大きな液胞（水を含む）をもち、予定胞子細胞集団の中心部を下方に突き抜けるように移動する。こうして柄細胞は長い柄を形成する。この柄の伸張とともに、予定胞子細胞が塊となって空中に持ち上げられる。このとき予定胞子細胞は胞子細胞へと分化し、子実体が形成される。

非常にシンプルではあるが、こうしてみると粘菌の胞子細胞は生殖系細胞に、柄細胞は体細胞に相当する。ゲノムを次世代へ伝える生殖系細胞と、サポート役に回り自らは死を迎える体細胞系への分化が起きている。こうした生命の基本に関わる分化がすでに粘菌で実現していることは注目すべきである。分化した細胞が、細胞集団の中で定まった位置を占め、役割分担を行っていることも特徴的である。2005年に、粘菌ゲノムが解読（DNAは3400万塩基対）されたが、遺伝子の数の多さは驚くほどである。動物、菌類、植物、いずれの遺伝子とも相同性が高い遺伝子を多数含む。細胞性粘菌は予想以上に複雑な生物かもしれない。粘菌には解明すべき謎が多い。

§3 カンブリア爆発と生物の多様性

6億年前より古い地層からは生物化石がほとんど発見されていない。多細胞化が起きた10億年前から4億年が経過しており、腔腸動物や節足動物などの祖先種がすでに棲息していたに違いない。しかし、これらの動物たちは柔らかい体だったために、化石として残らなかったのではないかと解釈されている。オーストラリア南部で、1940年代に発見されたエディアカラ生物化石群は、5.5億年前の腔腸動物や軟体動物の姿と解釈されてきた。21世紀になって、中国雲南省のド

ンシャンツオで発見された化石群は、5.8億年前に、すでに複雑な体制をもつ動物が棲息していたことを示唆する。卵割中の化石が発見され、卵割の様式から三胚葉動物の胚と推測された。

3.1 カンブリア爆発

硬い外殻をもつ動物が出現するのがカンブリア紀初期（5.2億年前）である。このとき、現生の動物につながるすべての動物門が、一斉に出現した。いわゆるカンブリア爆発（あるいは多様性のビックバン）と呼ばれている。カンブリア紀の動物化石には、現在のどの分類にも属さない形態をもった動物が多数含まれている。オパビニア、ハルキゲニア、アノマロカリスなどと名づけられた「怪物たち」たちを分類するためには、新しい動物門を当てなければならない。その多くの門がオルドビス紀を待たずに絶滅した。門や綱レベルで新しい動物が出現することを「大進化」と呼ぶ。その後5億年を通して、このレベルでの進化は起こっていない。それより下位の、目あるいは科のレベルにおける「小進化」だけである。中国のチェンジャンで発見された化石群から、カンブリア紀の爆発が汎世界的な規模であったことが確認されている。

3.2 生物の多様性

現在、種が特定され、学名が登録されている生物種は、約170万種に上る。正確に分類できない種、未知の種を含めれば、地球に棲息する生物の種数は、この10倍は下らないと見積もられている。分類とは多様な生物を比較し、似たもの同士をグループにまとめていく研究である。生物は進化の産物だから、生物の類縁関係に階層性が見られるのは当然である。生物分類学は、まずこの階層性を明らかにすることから始まる。分類学では最上位の分類に「界」を当て、それぞれの界の下に、門、綱、目、科、属、種を階層的に配置する。

植物は4つの門、動物は34の門に分類されるのが一般的である。全生物の種数を割合で比較すると、約5割が昆虫であり、全動物種の7割以上に達する。昆虫はその種数で他の生物を圧倒している。昆虫が節足動物門の一つの綱にすぎな

いことを考えると驚くべき多様化である。植物では被子植物が全植物種の8割以上を占め、やはり他の植物門を圧倒している。

34の門からなる動物であるが、そのほとんどが海棲あるいは水棲種である。陸上での生活に適応できたのはほんの一部、すなわち節足動物と脊椎動物の一部にすぎない。植物は水棲の藻類と陸上植物に大別されるが、後者（普通植物といえは陸上植物のこと）は乾燥した地上でも、繁殖が可能なくみを新たに発明している。動物にしても植物にしても、水中とは違った、乾燥した地上での生活に適応するのが、いかに難しかったかということである。

3.3 生物の分類

動物はその形態から、二胚葉動物と三胚葉動物とに大別される。二胚葉動物は「つぼ」状の体をもつ。つぼの内側が内胚葉、外側が外胚葉であり、それぞれ一層の細胞シートである。二胚葉動物には海綿動物と腔腸動物（クラゲ、イソギンチャク）が含まれる。それ以外の動物はすべて三胚葉動物である。

動物の基本体制は発生過程を通して生み出される。発生初期の細胞塊において、まず原腸形成というイベントが起きる。外胚葉と原腸の間に体腔が生じ、そこに中胚葉が発生することにより三胚葉動物となる。中胚葉からさまざまな組織・器官（筋肉、血管、心臓、骨など）が発生するが、その程度によって、原体腔動物と真体腔動物とに分類される。なお、内胚葉からは消化器官、呼吸器官などが、外胚葉からは皮膚や神経系などが発生する。原体腔動物には扁形動物（プラナリア）や線形動物（線虫、回虫）が含まれる。真体腔動物はそれ以外の多くの門が該当する。

真体腔動物はさらに前口動物（旧口動物）と後口動物（新口動物）に大別される。これは、原腸の陥入した部分が口になるか、肛門になるかの違いである。後口動物には棘皮動物（ヒトデ、ウニ、ナマコなど）、半索動物（ギボシムシなど）、脊索動物（頭索動物としてナメクジウオ、尾索動物としてホヤなど）が含まれ、それ以外

はすべて前口動物となる。地上で大繁栄した前口動物が昆虫であり、後口動物がヒトである。動物は進化とともに形態の複雑化を進めてきたが、その基本体制に大きな変更はない。動物の形態については、近年、形づくりの遺伝子（ホメオ遺伝子群）の普遍性が注目されている。その結果、従来の原体腔動物、真体腔動物、前口動物、後口動物といった伝統的分類が、一部見直しを迫られている。たとえば、形態の違いから類縁関係が遠いとみなされていた節足動物と線形動物は、ともに脱皮する動物として近縁であった。

陸上植物を「植物」と呼び、水棲植物を藻類と呼ぶ。現生の植物は4つの門に分けられる。コケ植物（2.3万種）、シダ植物（1.1万種）、裸子植物（750種）、被子植物（25万種）である。

コケ植物には維管束がない。シダ、裸子、被子植物はいずれも維管束がよく発達し、背丈の高い樹木に成長するものが含まれる。後で述べるが、維管束は水を吸上げ葉へ送る導管と、葉で生産された栄養分を根へ降ろす篩管からなる。維管束は単なる輸送用パイプの役割だけではなく、細胞壁にリグニンというタンパク質が蓄積して強度のある幹を作り、大木を支える構造となる。背の高い植物ほど光合成に有利だから、維管束の発明は植物進化の要ともいえる。

繁殖方法で分類すると、コケ植物とシダ植物は孢子による繁殖、裸子植物と被子植物は種子による繁殖である。孢子は強い耐性あり、乾燥に耐えて長期間休眠することが可能だが、いざ発芽しても、受精には水分が不可欠である。被子植物は花器官を発達させ、乾燥した環境でも受精が可能である。この違いの意味はあとの議論で明らかにする。

§4 繰り返す大絶滅

生物は新しい種が誕生する一方で、環境への適応に失敗したり進化に失敗したりした種が絶滅をしている。化石記録を通して絶滅の歴史を知ることができるが、非常に多くの種が絶滅している。これを自然の絶滅（背景絶滅）という。しかし、生物の多様化が著しく発展したこの6億

年の間に、一時に種の8~9割が絶滅するという「大事件」が何回か起きている。これは背景絶滅では説明できず、地球規模の、何らかの環境変動がその引きがねになったに違いない。

4.1 地球の寒冷化

絶滅の規模を表すグラフ（たとえば百分率）が、背景絶滅と明瞭に区別できるピークを示すとき、これを大絶滅という。科学者が大絶滅の存在に気づいたのは19世紀である。大絶滅が、地球規模での環境変動に起因することを疑うものはいない。しかしその要因については、科学者の間でいまだに混乱が続いている。

大絶滅の要因として、まず大規模な寒冷化と、それに伴う海水準低下（海退）が考えられた。200mもの海退があれば、海生生物の棲息場所が失われる。寒冷化の起こったことは地質時代における植物体化石や孢子、花粉化石の産出状況から裏付けられる。古生代デボン紀は地球全体が熱帯のように高温多湿だった。石炭紀から気候は序々に寒冷化し、ペルム紀には数千メートルの厚さの氷河が、中緯度地域まで発達した。中生代に入ると再び温暖化し、白亜紀は極地方まで豊かな森林が広がっていた。新生代第三紀に気候はまた寒冷化へと移行した。

地質学の研究によれば、20億年前から現在まで計4回、超大陸の形成と分裂が起きている（ウイソンサイクル）。いちばん最近起こったのは、古生代末のロデニア大陸とゴンドワナ大陸の衝突による、パンゲア大陸の形成である。中生代にはこのパンゲア超大陸が分裂を開始し、新生代のいまなおそれが継続している。1億年後にはアジアを中心に5回目の超大陸が形成される。超大陸の形成期にはプレート運動が減速し、火山活動が衰える。大気中に放出される二酸化炭素が減少し、温室効果がはたらかなくなると気候が寒冷化する。逆に超大陸の分裂期にはプレート運動が加速して火山活動が活発になり、大気中の二酸化炭素が増加する。地球の気候は温暖化する。その他にも、大陸の位置関係に強く規定される海流の変化がある。こうしておおよそ、古生代末と新生代初期の寒冷化の説明がつき、

一時は、大絶滅の要因は寒冷化である、と結論できたような雰囲気があった。

最近5億年間の二酸化炭素濃度の推移データがある。現在二酸化炭素濃度は分圧で0.036%。この5億年はこの1倍~10倍で推移している（3.5億年前の石炭紀には10倍。白亜紀も7、8倍）。温暖な気候と二酸化炭素濃度は正の相関関係にある。逆にデボン紀末、ペルム紀末は3倍程度に減少し、現在はカンブリア紀と同程度のレベルまで低下している。

4.2 5度にわたる大絶滅

白亜紀末の大絶滅に対して、1980年にアルバレス親子が巨大隕石衝突説を発表し、古生物学に大きな衝撃を与えた。このK/T境界（後述）の地層には、重金属のイリジウムが異常分布する。この地質学的事実を糸口に、アルバレス親子は、直径10kmの巨大隕石が地球に衝突し、大規模災害が起こり、大気汚染、地球規模の環境破壊によって大絶滅が起きたと結論した。さらに科学的根拠として、衝突時の高温による石英形成、大火災発生による大量ススの堆積、大津波の痕跡など多くの証拠をあげた。この隕石衝突説は大論争を引き起こした。この騒動の10年後の1990年に、人工衛星の観察により、メキシコ湾南部に直径170Kmのクレータが発見された。したがって、隕石衝突は歴史的事実として認定されている。

アルバレスの論文が契機となり、大規模絶滅の本格的な研究が始まった。その結果、海棲生物の大規模絶滅の規模が、定量的に明らかになった。最大級の絶滅は古生代と中生代との境界（P/T境界）で起こった。ここでは84%の属、96%の種が絶滅している。中生代と新生代の境界（K/T境界）でも大絶滅が起こった。ここでは47%の属、76%の種が絶滅している。この他にも3回、オルドビス紀末、デボン紀末、三疊紀末にもこれらに次ぐ大絶滅が起きている。

4.3 原因を求めて

K/T境界の絶滅に対する隕石原因説が有力視されたことから、他の4回の大絶滅についても隕石衝突の有無が検証された。結果は否定的である。

地球規模での寒冷化についても、地質学、古生物学の研究が進んで、より正確な情報が得られるようになると、下図に示す寒冷化の時期と、大絶滅の時期とが必ずしも一致しないことが明らかになった。第1の事変では2回の絶滅ピークがあり、1回目は海退と絶滅ピークとが一致しない。第2の事変では大陸氷河の形成時期と絶滅の時期が一致しない。第3の事変では間隔をあけて2回の絶滅があった。第4の事変は、海退から海進への移行期に相当する。第5の事変は温暖から寒冷への移行期にあたる。

古生代							中生代			新生代
V	C	O	S	D	C	P	TR	J	K	T
寒冷	温暖				寒冷		温暖			寒冷

こうして、5回の大絶滅のすべてに共通する地球規模の環境異変を特定するのは難しい状況となった。しかし最近、温暖化こそが大絶滅の原因であるという説が提唱されている。ただし、温暖化そのものではなく、温暖化による深層海流の停滞と、長期にわたる海洋の無酸素状態が、大絶滅の原因とされている。温暖化により大気温が上昇すると、海洋表面の水温が上昇し、上部が軽くなった海水は深海に沈みこまなくなり、上下の対流が停滞する。これが深層海流の大規模な停滞を招き、海洋底は非常に長期にわたって貧酸素状態となる。一度停止した深層海流が再び動き出すまでには、100万年単位の時間を要する。

最近の地質学研究から、古生代末から中生代初期にかけ、4000万年もの長期にわたって海洋貧酸素状態が発生したことが指摘されている（黒色粘土層の堆積）。P/T境界の上では、400万年にわたって無酸素状態が続いた。これが大絶滅の原因であるという説が有力視されている。さらに、他の大絶滅の前後にも、貧酸素あるいは無酸素事件が長期間続いたという証拠が集まってきた。白亜紀末に起こった巨大隕石衝突も、大絶滅の直接の「引きがね」でしかなく、生物を絶滅の崖っぷちへと追いつめていった真犯人は他にあるようだ。

地球規模での温暖化が、大絶滅の真の原因であるとすれば、6回目の大絶滅を回避する方策を立てることができる。歴史に学ぶとはこういうことで、大絶滅の研究は重大なのである。しかし、現時点ではまだ、大絶滅の真の原因を特定することはできていない、というべきであろう。

§5 植物の上陸 ―地上生態系の形成―

生物が地上で生きのびるためには、二つの条件が必須である。すなわち、酸素濃度の上昇と、オゾン層の形成である。酸素濃度の変化については推定データあり、5億年前、すでに現在の1割の濃度に達し、4億年前のデボン紀には2〜3割に増大した。また上空で、強い紫外線により酸素オゾンが生成された。オゾン層は30〜50Km上空で有害な紫外線をシールドすることになった。植物の地上での繁栄により酸素濃度は急速に現在値に達する。地上でシダ植物が大繁殖する石炭紀には、一時的ではあるが、酸素濃度は現在値より高かったらしい。

5.1 植物の進化

植物の祖先は海棲藻類のシャジクモである。最初に上陸に成功したのはコケ植物と推測される。最古の植物化石として、シルル紀のリニア植物が知られている。シュート構造と孢子囊をもち、シダ植物の祖先種と見なされている。オルドビス紀からデボン紀へ移ると気候は温暖化し、一年中熱帯の蒸し風呂のような高温多湿の気候が続いた。シダ植物は細胞壁にリグニンを蓄積して丈夫なパイプ構造を作り、維管束を発達させる。維管束は水分と栄養の輸送路となるばかりでなく、植物の構造強度を高め、背丈を高くし、葉が光を十分受けることを可能にした。葉にはクチクラが発達し、乾燥に強くなった。当時のシダ植物であるロボクやリンボクは背丈が20〜30mにも達する巨木である。当時の Gondwana 大陸やローラシア大陸にシダ植物の大森林が形成され、その遺跡が現在ヨーロッパ、中国、東アメリカなどで大規模な石炭層となって残っている。世界中のデボン紀の地層からはシダ植物の孢子化石が発見されるが、デボン紀以

降は、地球規模の大森林が形成されることはなかった。

ところが古生代末のペルム紀に、パンゲア大陸の形成とともに寒冷化が始まる。大規模な氷河が発達し、シダ植物の大森林は衰退する。この時期に、シダ植物に代わって、種子をもつ裸子植物が進化してくる。裸子植物は、いまは絶滅して化石でしか知られていないシダ種子植物から進化した。現生の裸子植物と被子植物に直接の類縁関係がない。裸子植物は、乾燥していても受精が可能な生殖方法を発明した。こうして中生代三疊紀やジュラ紀には、シダ植物に代わって裸子植物が繁栄する。大型爬虫類である恐竜たちは裸子植物の葉や種子を餌としていた。

パンゲア大陸が分裂期にある白亜紀は、気候が再び温暖化する。この白亜紀には、より乾燥に強い、花器官による生殖方法を発明した被子植物が、著しく多様化を遂げる。被子植物の起源については現在もよくわからない。祖先は裸子植物と同じペルム紀に、シダ種子植物から進化したと考えられている。

後に述べるように、被子植物の著しい多様化(25万種)は、花粉を運ぶ昆虫との共進化によるものである。白亜紀には現生の花がほとんどでそうだが、モクレンやハスは古代の花の末裔である。被子植物は栄養豊かな果実を実らせ、種子を動物によって広範囲に散布するしくみもあみ出した。被子植物の繁栄により、裸子植物は分布域を奪われ、高緯度地帯へと追いやられた。白亜紀には中緯度地方に四季が訪れるようになり、樹木の幹に年輪が現れた。極地方にはまだ氷床が発達していない。

新生代の第3紀には、地球の気候が再び寒冷化していく。寒冷化による乾燥とともに、草原が広がり、砂漠化も進む。被子植物は、広葉樹から草本類へと多様化が進んでいく。白亜紀末に絶滅した大型爬虫類に代わって、それまで隙間で棲息していた小型哺乳類が繁殖する。哺乳類の祖先は三疊紀に現れている。哺乳類は被子植物の葉、種子、果実を餌とした。被子植物の種や果実は高い栄養価をもつので、体温を一定に保つために大きなエネルギーを消費する哺乳類

にとっては格好の餌である。

第4紀(180万年前から現在まで)には、高緯度地域に繰り返し氷河が発達する。氷河期を経るたびに、植物の分布が代わり、現在の植物相が形成されるに至っている。どんな目立たない植物にも、また希少種にも、それぞれ厳しい環境を生き延びてきた歴史がある。氷河期に絶滅したかと思われたメタセコイアなども北米とアジアで生き残っている。またイチヨウは一属一種の貴重な種である。

5.2 植物の生殖方法

以下、植物がどのように生殖方法を進化させ、寒冷化と乾燥とに適応したかをみていく。シダ植物は葉の裏側に胞子嚢をもち、中で減数分裂により胞子が作られる。散布された胞子は発芽し、配偶体となる。配偶体は細胞分裂して「葉状体」というハート型の植物体を生じる。その上に、造精器と造卵器が作られ、精子は泳いで卵子に達し受精する。そこから胞子体が改めて成長をし、親の植物体となる。

コケもシダも受精に水分を必要とする。配偶体も胞子から発芽すれば自分で増殖し、乾燥には弱い。コケもシダ也多湿な環境でなければ生きていけない。陸上生活に適応したといっても乾燥は大敵である。その代わり、胞子はスポロポレニンという物質でコーティングされており、乾燥に対する耐性はすこぶる高い。胞子は風や川の流れでかなり広範囲に散布される。風で空中に散布される胞子もある。湿度の条件が満たされれば胞子が発芽し、分布域を広げる。

種子植物は生殖方法を根本的に改善した。花粉による受精へと切り替え、受精に水分がいらなくなった。裸子植物は雄花から花粉が風で散布され、雌花へ運ばれる。雌花には卵細胞を皮でつつんだ胚珠があり、その一部が開いて入り口を作っている。花粉から飛び出した精子は、この入り口に満たされた液体の中を泳いで卵子に達し、受精する。環境が乾燥しても受精に成功する。受精卵は発生して種子となる。被子植物は受精のしくみを一段と発達させる。花器官の形成である。

ガク片、花弁、おしべ、めしべ、これらの花器官はいずれも葉の変形によって形成された。おしべは、シダの小孢子嚢を葉が包み込んだものの、同様にめしべはシダ植物の大孢子嚢を、葉が包み込んだものである。もとはといえば、外気を遮断して、乾燥を避けるとともに保温するのが目的であったと思われる。

おしべの葯に含まれる花粉が、めしべの柱頭につくことにより、受粉が行われる。花粉は栄養細胞（やがて花粉管になる）と、その内部に含まれる2個の精細胞からなる。同じ花のおしべの花粉がついても受精は成立しない。花粉管の伸張を妨げ、自家受精を抑制する巧妙なしくみ（花の構造、遺伝子産物による自他認識機構）があり、異なる遺伝形質をもつ花粉の場合にのみ花粉管が伸張できる。

花粉は風（イネ）、水、昆虫、鳥（ツバキなど）、こうもり（サボテン）などにより運ばれる。自然の風まかせでは送粉の確率が小さいので、動物、とくに昆虫（甲虫、ハチ、チョウ）による送粉のしくみを発達させた「虫媒花」が圧倒的に多い。被子植物のあみ出した受粉のためのさまざまな戦略は、花器官と昆虫の共進化をもたらし、互いに著しい多様化を推進することになる。

めしべの柱頭へついた花粉は花粉管を伸張させる。花粉管の内部を2個の精細胞が胚珠へと移動する。花粉管の伸張には、胚珠からの誘導が必要である。胚珠は子房の中で二重、三重の珠皮でおおわれている。外界から完全に閉じた内部環境が形成されている。花粉管は珠皮が一部口をあけたところへ誘導され、精細胞が飛びでて1個が卵細胞と受精する。つづいてもう1個の精細胞が極核と受精する。これを重複受精といい、被子植物の特徴である。受精卵は発生し、胚となる。極核2個と精子核からなる3倍体細胞も発生して、胚乳となる。すなわち、被子植物の種子は、将来植物体となる胚と、発芽の栄養となる胚乳とからなっている。

種子は、反足細胞から生じた組織を通して、親植物から栄養補給を受け、すぐには離れない。将来の発芽の準備が、種子内部である程度進行

する。種は発芽のための栄養を蓄えた胚乳をもつため、鳥や小動物の格好のえさとなる。種を貯蔵した動物が、それを食べ忘れると、種が発芽する。子房や、子房の下部が肥大し、栄養豊かな果実となる花もある（真果、偽果）。果実もまた、哺乳類や鳥類の餌となる。動物に食べられても、消化されなかった種子は、やがて糞となって排泄され、その結果、種子が広い範囲に散布されることになる。中には、動物の消化酵素にさらされてはじめて発芽する種子もある。いずれにしても、こうして種子は親植物から遠く離れたところに運ばれて出芽する。動けない植物が、種の分布域を拡大するために発明した、まことに巧妙な繁殖戦略である。

5.3 植物と微生物の共生

植物は単独で上陸し、地上で適応することに成功したわけではない。微生物との共生が必須であった。現在もなお、植物は、菌類やバクテリアと緊密な共生関係を結んでいる。そもそも、植物が根を下ろす土壌には、多くの生物種が棲息し、土壌生態系を形成している。バクテリア、菌類などの微生物以外にも、線虫、ダニ、トビムシ、ハエやアブの幼虫、クマムシ、ミミズ、モグラなどの動物がいる。他を圧倒して多いのは線虫である。

共生のもっとも原始的な例は地衣類である。地衣類は菌類と藻類の共生した例で、世界中の至るところに棲息する。極地方から高山まで、それこそ極限的な環境、植物では棲息が不可能な環境にも耐えて生きている。植物と菌類（カビ、キノコ）の共生はよく知られた例である。菌類の菌糸が植物の根と共生して、菌根を作る。菌類は土壌からリンを供給し、植物は菌類に光合成産物の栄養を提供する。菌糸は植物の根にからみつくだけの外生菌（キノコの多く）と、根の細胞内へ進入する内生菌（VA菌）がある。外生菌と根の関係は特異的である。

一方、内生菌の場合は植物との関係が特異的ではなく、むしろ複数の植物が共通のVA菌と共生関係を結ぶ。こうして地中に菌根ネットワークが形成される。若くてまだ背丈が低い樹木は、

大木の日陰になり、十分光を浴びることができない。ところが、こうした弱い若木には、成長した大木から菌根ネットワークを経由して、栄養が分け与えられていることが明らかになった。菌根をもつ植物は8割に達するという。根菌ネットワークの形成によって、森林生態系は安定に維持されているのである。

根のまわり数ミリの根圏には、他の場所の10倍から数百倍の道度でバクテリアが棲息するといわれる。マメ科植物（マメ、クローバなど）は根粒を形成する。根粒内部は土壤に棲む根粒菌が細胞内共生している。根粒菌は細胞内へ運ばれ、そこで変身して窒素をアンモニアに変換する（窒素固定）。窒素固定は環境の酸素を排除する必要があり、植物細胞とバクテリアいが共同で酸素を吸収して遠ざけるためのレグヘモグロビンを合成する。植物や菌類は動物との共生関係を結ぶその一方で、動物による捕食に抵抗するため、茎を強固にしたり、刺をつけたり、毒性物質を合成したりする。こうした、生物間の排除と共生の連鎖、複雑な相互作用の上に、地上生態系は成り立っている。ここでは植物と微生物との共生に注目したが、昆虫と微生物、植物と昆虫の間にも緊密な共生関係があり、共生はむしろ生物が繁殖するための自然の姿とさえいえる。生態系は、生物間の相互依存により維持されていることを忘れてはいけない。

§6 動物の上陸 ―地上生態系の発展―

デボン紀には植物について動物が上陸に成功した。節足動物と脊椎動物である。陸上動物の体制は水棲の時代とほとんど変わらない。陸上での生活にあたって、器官の一部を作りなおすことはしても、新たな器官を発明することはなかった。例外は卵生から胎生へと生殖方式を変更した哺乳類である。哺乳類は胎盤という新しい器官を発明した。

陸上での進化とは、つまりは器官の一部を改変することである。摂食のための口器、移動のための脚、生殖のための器官などに、著しい進化の足跡をみることができる。これらを理解する上で適切な例が昆虫である。昆虫は陸上生活

への適応にもっとも成功した動物であり、先にも述べたように全動物の種数の7割以上を占めている。

6.1 昆虫と脊椎動物の体制

昆虫も脊椎動物も、ともに地上で大繁栄した動物であるが、その体制（体作り）は対照的である。動物は、捕食行動（栄養補給）、生殖行動（子孫繁殖）、逃避行動（危険からの逃避）などのために、外部からの刺激にすばやく反応し、状況に応じた適切な行動をとるしくみを発達させた。その要が神経系である。もちろん植物には神経系は存在しない。植物は、外部刺激に対し、体の一部あるいは全部で、ゆっくりした反応を示す。

それぞれの動物は、特徴的な神経系を進化させたが、それは発生過程と深く関連している。昆虫は左右対称（はしご型）の神経系を形成する。昆虫の頭部神経節はとくに大きく、脳神経節（微小脳）と呼ばれる。他に胸部および腹部神経節が大きい。昆虫の神経系はこのように分散型である。一方、脊椎動物は、脊索から誘導された神経管から中枢神経系が発生する。前部が膨らんで脳となり、残りが脊髄となる。神経管の背側から神経堤細胞が分化し、中枢神経系に寄り添うように末梢神経系が形成される。昆虫の神経系は消化管の下部に、脊椎動物の神経系は消化管の上部に位置する。昆虫と脊椎動物とで、配置も見かけもまったく異なる神経系だが、その発生を支配する複数の遺伝子が驚くほど似ている（相同性が高い）ことが明らかになっている。

昆虫と脊椎動物の骨格系もまた対照的である。昆虫は外骨格を形成している。キチン外層が節片に分かれ、関節部をまたぐように筋肉が連結して、昆虫のすばやい行動を可能にしている。脊椎動物は体の内部に骨格が形成され、強靱な関節部で連結されている。骨には筋肉がついて、脊椎動物の行動を支配する。循環系についても、昆虫と脊椎動物は体制が異なる。昆虫は背中にスポイトを連ねたような背脈管を持ち、スポイトの後方から吸いこんだ血液を前方へ順に押し

出すようなポンプとなっている。先端から放出された血液は体内に拡散する開放血管系である。一方、脊椎動物は大動脈が融合してねじれてできる心臓が強力なポンプとなり、体全体にくまなく分布する血管に血液を押し出す閉鎖血管系をもつ。昆虫は酸素を供給する血液が拡散によって体内にいきわたるので、大型化には限界がある。脊椎動物は毛細血管を通して酸素が体のすみずみまで供給されるので、大型化に成功した。

6.2 昆虫の進化

節足動物の名は、体節の付属肢に関節があることに由来する。節足動物は4つの綱、すなわち昆虫類、銚角類、多足類、甲殻類からなる。すでに絶滅した綱に三葉虫類がある。昆虫や銚角類は古生代より以前に海で分化し、それぞれデボン紀に上陸に成功したと推測されている。

デボン紀に上陸を果たした祖先型昆虫は翅をもたなかったが、地上で進化した昆虫の多くが、胸部の第6体節に前翅、第7体節に後翅をもつ。階級や性によっては無翅の種があったり、翅がすっかり退化して無翅となった昆虫もある。昆虫の多様性は口器と翅の変形に由来する。栄養を摂取するための口器は、植物を噛み砕く、茎から樹液を吸引する、小動物を捕食するなどの用途に応じて、著しく変化した。飛翔のための器官である翅もまた、飛翔力を高める方向だけでなく、体の乾燥を防ぎ、腹部を保護する器官へと変化した。翅の獲得は、昆虫に行動の自由度を与え、捕食方法を強化し、繁殖域の拡大を実現した。昆虫が地上で大繁栄する一因は、間違いなく翅の獲得による。

祖先型昆虫に近い形態をもつとされるトビムシ（土壌昆虫）は、口器が体内へ陥没した内顎型である。同じく祖先型に近いシミ類は外顎型で、紙の害虫としてしばしば目にする。シミ類は頭蓋に二点で固定される大顎をもち、有翅昆虫の祖先種と見なされている。翅は、体節の付属肢から発生し、気管と血管、神経がかような特徴的な翅脈をもつ。カゲロウやトンボはもっとも祖先的な有翅昆虫である。トンボ類は強力な飛翔力をもつが、その翅は基本的に上下に羽ば

たくのみである。やがて、翅を後ろに畳める新しいタイプの昆虫（直翅類と新性類）が登場する。直翅系ではバッタ、ゴキブリなどが森林で繁栄する。

次いで、餌を噛み砕くタイプの口器から、樹液などを吸引するストロー状の口器をもつ昆虫が出現する。チャタテムシなどである。哺乳類に寄生するシラミ類は退化して翅を失っている。吸引型口器の発達したのがカメムシとセミである。カメムシでは、前翅の半分が硬化し鞘状になって、腹部を保護する役割を果たすようになる。

さらに、幼虫からいったん蛹を経て、まったく異なる形態をもつ成虫となる、いわゆる完全変態昆虫が出現する。代表的な甲虫類は、前翅を鎧と化して腹部を保護し、後翅を薄い膜状として前翅と腹部の間に折りたたむ。甲虫類はこの後翅で巧みに飛翔する。甲虫は陸棲、水棲、半水棲と棲息環境も多様であり、最大の目を形成している。種の多さは驚くべきもので、全動物の4割に相当する。甲虫には体長10センチを超える大型種もいる。

甲虫と並び大成功したグループがハチ目（アリを含む）である。形態的、生態的に多様化が著しい。ハチとアリはまた社会性の発達した昆虫でもある。甲虫とハチの多様化は被子植物（花をつける）の多様化と関連している。虫媒花のほとんどは、甲虫とハチが送粉者である。被子植物が特定の昆虫だけが花粉や蜜にありつけるよう花器官が複雑な形態に変化する一方で、昆虫もまた適応のために多様化した。こうして白亜紀以降、昆虫の多様化に一層拍車がかかった。なお、蝶や蛾の仲間は、翅に生えた毛が鱗片に化した鱗翅類であり、もっとも進化した昆虫である。

6.3 脊椎動物の進化

脊椎動物の祖先は脊索動物とされる。脊索とは、体の中央を前後に走る硬いゼラチン状の棒状組織で、筋肉成分を含み、運動の機能も果たす。外胚葉から脊索に誘導されて神経管が発生する。ナメクジウオは現生の脊索動物であるが、

完全には閉じていない桶状の神経管を持ち、頭部には脳のような構造がない。脊索動物から、尾索動物（ホヤ）、頭索動物（ナメクジウオ）、そして脊椎動物が分岐するのは4億年以上前のことである。

脊椎動物も、脊索動物同様、発生初期に脊索が現れ、それから閉じたパイプ状の神経管が誘導される。しかし脊索は、やがて脊椎骨で置換され消失する。脊椎動物は、魚類、両棲類、爬虫類、鳥類、哺乳類へと進化するが、からだの体制は基本的に変わっていない。脊椎動物である魚類の祖先は、無顎類、円口類などで、オルドビス紀に大繁栄する。軟骨魚類、板皮類などを経て硬骨魚類が出現し、さらに鰭（ヒレ）のなかに骨が発達した肉鰭類から、四足歩行する両棲類が進化したというのが定説である。

両棲類はデボン紀に上陸に成功した。両棲類は卵を水中に生むので、水辺から完全に離れた生活を営むことができず、内陸での繁殖が制限される。古生代ペルム紀に現れた爬虫類は、羊膜に包まれ、硬い外殻で保護された卵を生む。このため、乾燥した内陸でも産卵が可能で、繁殖範囲をおおいに拡大することができた。中生代三畳紀には、いわゆる恐竜（直立二足歩行可能な爬虫類、竜盤目と鳥盤目に大別される）が進化する。ジュラ紀には背丈が15mを越す大型の草食恐竜がいた。このころ、すでに鳥類の祖先である始祖鳥が出現している。続く白亜紀には大小さまざまな恐竜が著しく多様化し、翼竜、首長竜などが現れている。

化石調査によれば、恐竜は嗅覚、視力が発達し、子育てや集団生活を営んでいた種もあったという。まだ議論はあるものの、恒温動物（温血）説が有力であり、骨の内部が空洞化（軽量化）、羽毛を生やしていたという知見もあり、鳥類とよく似ている。恐竜は2億年もの長きにわたり地上の王者として繁栄を続けたが、白亜紀末に絶滅することは先に述べたとおりである。

6.4 哺乳類の登場

恐竜に代わり、新生代の地上で繁殖するのが哺乳類である。中生代三畳紀に爬虫類型哺乳類

が誕生し、白亜紀に原始食虫類へと進化している。白亜紀は被子植物が分布を拡大し、昆虫が共進化した時代である。食虫哺乳類の進化は、この時代の昆虫の多様化に呼応したものである。サイズはネズミかリス程度、昆虫だけでなく、被子植物の種子（トチノキ、クルミ、ドングリなど）を餌とする雑食性であった。恐竜とは違い、栄養豊かな種や果実をエネルギー源としていた。こうした豊富な栄養補給の裏付けがあったからこそ、エネルギー効率の悪い恒温性の哺乳類が地上で繁栄できたといえる。変温動物は寒冷地帯では筋肉が冷えて動くことができないので、棲息範囲は温暖な低緯度・中緯度地方に制限される。恒温動物は、気温が低下する夜間でも、寒冷地帯においても、体温が一定に保たれるので行動に制約がない。極寒期における低温への対策、たとえば皮下脂肪を厚くする、厚い毛を生やす、地下や樹木の空洞に住処を設ける、などをすれば、高緯度地方や高山地帯へ棲息範囲を拡大することが可能である。

哺乳類の繁栄はまた、胎生を発明したことにも強く依存する。他の動物はみな卵生である。一部例外はあるものの、基本的に親は卵を生みっぱなしで、孵化した直後から、幼生は自分の力で生きのびるしかない。胎生では、親の体内で胚が発生し、親と同じ姿にまで成長した赤ちゃんが生まれる。誕生後は親から乳を与えられて育つ。大きくなれば餌を与えられ、生きるのびるため必要なさまざまな学習を受ける。子がある程度成長するまで親から離れないという生殖方式は、ある意味で被子植物と似ている。

新生代後期に地球は再び寒冷化し、4度の氷河期が襲ってくるが、それを乗り切るために一部の哺乳類が獲得した能力が、冬眠ではないかと思われる。現生哺乳類4070種のうち約6%の240種が、冬季に冬眠することが知られているが、この能力は、ヒトも含めたすべての哺乳類に潜在するかもしれない。

§7 人類への道

哺乳綱、霊長目、ヒト上科が誕生するのは、新生代第3紀漸新世である。このヒト上科から、

600万年前ヒト科が分岐する。最初に現れるのがアウストラロピテクス（南の猿の意味）で、通常「猿人」と呼ばれる。約250万年前には最初のヒト（ホモ）属であるホモハビリス（能力のある人の意）が誕生し、180万年前にはホモエレクトাস（原人）が現れる。原人は100万年前ころ、アフリカからユーラシアへ拡散したと推定されている。約30万年前には、ヨーロッパや西アジアにホモネアンデルターレンシスが出現し、「旧人」と呼ばれているが、それ以外にも旧人の種が複数出現したことが明らかになっている。ネアンデルターレンシスはヨーロッパで進化した旧人とされる。アフリカでの近年の発掘調査によると、ヒト科の分岐はかなり複雑なものであり、詳細はまだ不明な点が多い。一つだけ確かなのはこれらヒト属の他の種はすべて消滅し、唯一サピエンスだけが生き延びたということである。

7.1 サピエンスの登場

180万年前から現在までが、新生代第4紀にあたる。繰り返し氷河が発達した時代であり、更新世の間に4回の氷河期があった。氷河期には、平均で10℃の気温低下が起こり、85～140mにもおよぶ海退があったとされる。ヨーロッパでは北緯50度付近まで、北米では北緯40度付近まで、氷河が発達した。よく言われるように、人類と他の動物との一番の違いは、道具の発明と火の利用である。250万年前のハビリスはすでに石器を作成していたという証拠がある。火の利用の最古の証拠は約80万年前に遡るという。

氷河期には、水深の浅い海峡は陸橋と化し、アジアとアメリカ、東南アジアからユーギニア、オーストラリアにかけて地続きになった。ヒト以外の生物は寒冷化によって分布域を大幅に縮小させられた。寒さに耐えられず絶滅した種も多い。ところが原人、旧人はこの時代にアフリカからユーラシアへ分布を拡大し、新人に至ってはオーストラリアと南北アメリカまで拡散していった。第4紀を「人類紀」とよぶゆえんである。

約20万年前に、アフリカ東部でホモサピエン

ス（知恵のある人の意）が出現する。サピエンスは「新人」と呼ばれ、われわれ現生人の祖先にあたる。第4氷期（ウルム氷期）は13万年前から1万年前まで約12万年間続いたが、その初期の10万年前ころ、サピエンスはアフリカからヨーロッパと西アジアへ拡散している。さらに5万年前ころには東アジアにまで進出した。もっとも寒冷だった2万年前には、陸橋を踏破することにより北アメリカやオーストラリアに進出している。近年、現代人に対するミトコンドリアDNAの比較研究から、上記のサピエンスの放散過程が遺伝子レベルで裏付けられるようになった。

サピエンスは氷河期に分布を縮小するどころか、広大な新天地へと分布を拡大した。いまや極地方にまで棲息範囲を広げているヒトは、他の生物からみればまったく特異な生物である。氷期に高緯度地方を移動するためには、暖をとり、食物を煮たり焼いたりするための「火」を、自在に制御する技術が不可欠であったと思われる。先にも述べたように、人類はかなり以前から火を利用していた証拠があるが、火を自在に操る技術を獲得したのは、サピエンスが最初であったに違いない。ネアンデルターレンシスも火を利用した証拠があるが、焚き火などの原始的段階に留まっていたらしい。

7.2 文化の発祥

サピエンスだけがもつ特異な能力に「言語」がある。言語の起源は非常に難しい問題で、現在もなおこの問題は決着していない。脳科学によれば、われわれサピエンスには言語を操作する生得の能力があり、生後どんな言語刺激にさらされるかによって、言語野が自己組織化されるという説が有力である。化石人の脳の左右差、言語野発達の度合いから、エレクトাসにはすでに言語能力が備わっていたという考えもある。しかし著者は、言語を獲得できたのはサピエンスだけであり、その時期を5万年前と推定している。

遺跡調査によれば、オーリニャック期（4.2万年前～3.2万年前）から、堰切ったようにすぐれた壁画、彫像、ビーズ、楽器などが多数出土す

るようになる。人類学者は「文化」の発祥とみなしている。この時期、サピエンスの脳に何か「質的」な変化が起こったことは間違いない。因果関係が不明確ではあるが、この質的変化を言語の獲得と結びつけて考えたい。その後のマドレーヌ期（2万年前～1万年前）に至ると、死者を手厚く埋葬する祭祀が活発になり、精神性や神秘性への認識が進んだと考えられている。ヨーロッパの1.5万年以上前の洞窟（アルタミラ、ラスコーなど）には、躍動感あふれる動物たちの姿が描写されており、それは今みても遜色ないすばらしいものである。こうしたことから、5万年前のサピエンスの赤ん坊を連れてきて教育をすれば、現代人と何ら変わるところがないという意見がある。

言語は情報を「知識」として子孫に伝達する手段をもたらした。ヒト以外の動物は、情報が、もっぱら遺伝子、あるいはそれに本能行動の学習を加えて伝達される。この点がヒトは他の動物と決定的に異なる。「氏か育ちか」という言葉に象徴されるように、ヒトは遺伝子にすっかり支配されているわけではなく、言語を通して、先人が得た知識を効果的かつ大量に学習し、自ら抽象的な概念を操作し、新しい発明・発見を行う。脳が遺伝子支配を離れて、大規模に「自己組織化」するのである。

7.3 農耕と定住化

サピエンスは、巧みな加工を施したさまざまな石器、骨、角、象牙などを狩猟に使用しており、すぐれたハンターだったことは明らかである。サピエンスの遺跡から、絶滅した哺乳動物の骨が大量に発掘されることから推測されている。狩猟生活が中心ではあるが、植物を衣食住に活用する技術も発達した。樹木からは住居用建材を、草本類からは衣服の原料を得た。被子植物の種や果実などを採取して食料の一部とした。

氷期が終わり、ふたたび温暖化が始まった1万2千年前ころ、サピエンスの生活に劇的な変化がおとずれた。農耕の始まりである。野性種からの採取（自然採取）では、実が小さかったり収

穫量が乏しかったりするのは避けられない。そこで野性種を畑で栽培したり、人為的に品種を改良することにより、栄養価が高く、おいしく、収穫量も大きい穀物へと変身させることに成功した（育種）。不確実な自然採取から、計画的な穀物栽培への転換である。

穀物栽培による安定な食料生産が可能になり、サピエンスは狩猟生活から定住生活へと移行する。その後も収穫量を上げるため、寒さや病気に強い穀物を育種する努力がたゆまずなされている。農学研究者によると、食用が可能な被子植物は最大で10万種あるという。人はそのうち最大1万種の食用植物を試したが、現在育種し、栽培しているのは200種、さらに食料生産の90%は20種の穀物（小麦、イネ、トウモロコシなど）であるという。こうして、安定に収穫が期待できる農耕の確立により、ヒトは集団化して定住することが可能となった。

6千年前ころから、石器に代わって金属器が登場する。強力な武器とともに、開墾用、収穫用の農機具などが生産された。農耕が大規模化すると、多くの人間を集団で維持できるようになった。チグリス・ユーフラテス川、ナイル川、黄河など、大河流域の肥沃な土地には、古代都市が建設された。都市の成立とともに、市民階級と支配階級の分離、職業の分化などが進んだ。同じころ、文字（甲骨文字、神刻文字、くさび形文字など）が発明される。人口が増加すれば、規律、法律が必要になる。「目には目を」で知られる最古の法律書、ハムラビ法典（都市バビロン）の成立は、紀元前18世紀のことである。

哲学や科学の発祥は、約2千年以上前のギリシャにさかのぼる。しかし、その後、中世までの長い期間、ヨーロッパはキリスト教会の影響下に置かれ、科学にとっての暗黒時代が続いた。17世紀以降、人間の生きる道を説く宗教と、自然の法則や普遍性を追求する科学とは別であるとする考えが、ようやく一般に普及し始める。こうしてみると、物理や化学といった近代科学は、高々300年の歴史でしかないことに改めて気づかされる。

§8 おわりに

生物は棲息環境への適応に成功した種が生き残り、分布を広げることができた。環境を自分たちの生活と繁殖に都合がよいように（大規模に）改変する生物種はヒトだけである。ヒト以外の動物は、基本的に環境に適応することによって生き延びる（受動的な戦略）。なぜなら、ヒトは、他の生物とは比較にならないほどすぐれた脳を発達させたからである。

化石の頭蓋骨から脳重量を推定すると、爬虫類である恐竜の脳は、体の大きさに比べ、たいへんに小さかったことがわかる。大型草食恐竜のアパトサウルスは体重30tで脳重量が300 g（重量比0.001%）、姿がダチョウに似て、知能が高かった肉食恐竜サウロルニトイデスは体重50kgで脳重量が50g（重量比0.1%）である。恐竜の体重と脳重量の関係をグラフにプロットすると、脳重量は体重の0.25～0.45乗に比例することがわかる。この関係は現生の爬虫類の場合とほぼ同じである。恐竜の脳は細長く、脳幹にわずかに辺縁系（線状体）がつけ加わったようなものである。脳機能は、辺縁系が支配する、生き延びるための本能行動が中心で、大脳新皮質の機能である知能は、いまの爬虫類とそう変わらなかったであろう。ただし、翼竜には鳥類と同程度に高い知能をもつものがいたと推測される。大きな恐竜の行動はかならずしも鈍重ではなかった。なぜなら、歩く、走る、攻撃する、逃避するなど、すばやい行動を起こすための後肢が、仙骨付近にある腰仙神経集網に支配されていたからである。同様に、前肢は肩の部分にある腕神経集網に制御されていた。しかも仙骨の神経集網の方が脳の10倍も大きかった。哺乳類になると、脳の割合が増大し、体重3kgのネコの脳重量は30gある（重量比1%）。脳重量は体重の0.55乗に比例する。哺乳類の脳が爬虫類の脳と違うのは、大脳新皮質がよく発達していることである。

人骨化石から脳の重量が推定されている。平均値は、猿人400 g、原人800 g、ネアンデルタール人1500 g、サピエンス1400 gである。現代人についていえば、体重65kgの人で脳重量1400 g

（重量比2.1%）である。猿人の脳は類人猿と大差ない。ネアンデルタール人は別として、サピエンスの脳は、あらゆる動物の中で飛びぬけて大型である。そしてそれが、わずか600万年の間に3倍に増大している。重量増大のほとんどは、脳幹に覆いかぶさるように膨張した大脳新皮質によるものである。進化の時間的尺度を考えると、これは特異ともいえる現象である。何かの箍（たが）が外れたような印象さえ受ける。脳のサイズを決める遺伝子に変異が起こったのかもしれない。

生命40億年の歴史を長さ2mの年表に表したとすると、ヒトの20万年の歴史は、年表の最後の、幅わずか0.1ミリに記されるにすぎない。ヒトは脳によって地球の歴史、生命の歴史を明らかにした。こうしたすぐれた脳をもつサピエンスの末裔が、その一方で、18世紀の産業革命以後、地球環境を急激に変貌させている。46億年という長い時間をかけて、地球と生物とがつくりあげたこの環境を、まばたきにも相当する短時間で破壊しつつある。オゾンホールの実現、地球温暖化傾向などは、高々この100年間にわれわれが招いた事態である。

40億年前に海で誕生した生命はさまざまな進化を遂げて、海洋生態系、地上生態系を形成、いずれも著しい多様性を達成した。そして地球の歴史からいえば最後の最後に、ヒトが出現した。ヒトが出現したことの意味が、地球環境を変容させ、数億年をともに生きた仲間たちに6回目の大絶滅をもたらすことであってよいはずがない。

この論文では、単細胞生物から多細胞生物への進化がどのように起こったのか、なぜこのように多様な生物が地球に棲息しているのかを明らかにした。その背景には、進化の道半ばで絶滅していった、膨大な種類の生物たちが存在する。生物間の共生もまた広く見られる普遍的な現象である。生命の多様性は、つまりは共進化と絶滅とが交差する複雑な歴史の産物である。これが進化の真相である。この論文の続編となる次の総説では、ヒトの脳の進化、そのすぐれた機能とメカニズム獲得の謎について考察したい。

(2008年6月16日受付、2008年7月4日受理)

参考文献

この論文は、多数の文献をもとに行った枚举型研究の成果であるため、参考とした文献すべてを引用することは困難である。ここには、論文の内容と深く関連する文献に限って、一部を挙げておく。

全 般

- 佐藤和弘：『生命と地球—総論としての生命の起源と初期進化—』（論文Iと引用）青森公立大学紀要第13巻1号（2007）pp.11-21
シリーズ進化学1：『マクロ進化と全生物の系統分類』岩波書店（2004）
シリーズ進化学2：『遺伝子とゲノムの進化』岩波書店（2006）
シリーズ進化学3：『化学進化・細胞進化』岩波書店（2004）
シリーズ進化学4：『発生と進化』岩波書店（2004）
シリーズ進化学5：『ヒトの進化』岩波書店（2006）
S.J.グールド：『ワンダフルライフ』早川書房（1993）

多細胞体制・発生関係

- 宮田隆：『眼が語る生物の進化』岩波書店（1996）
前田みね子・前田靖男：『粘菌の生物学』東京大学出版会（1978）
漆原秀子：『細胞性粘菌のサバイバル』サイエンス社（2006）
石原勝敏：『発生のプログラム』裳華房（1986）
岡田益吉編：『発生遺伝学』裳華房（1996）

大絶滅関係

- 大前巖：『二酸化炭素と地球環境』岩波書店（1999）
D.M.ラウプ：『大絶滅』平河出版社（1996）
松井孝典：『再現！巨大隕石衝突』岩波科学ライブラリー（1999）
平野弘道：『繰り返す大量絶滅』岩波書店（1998）
平野弘道：『絶滅古生物学』岩波書店（2006）
東京大学地球惑星システム科学講座編：『進化する地球惑星システム』東京大学出版会（2004）

地上生態系関係

- 白田昭：『微生物に学ぶ』工業調査会（2001）
大森正之・渡辺雄一郎編：『新しい植物生命科学』講談社サイエンティフィック（2001）
「植物の軸と情報」研究班：『植物の生存戦略』朝日新聞社（2007）
トム・ウエイクフォード：『共生という生き方』シュブリンガー東京（2006）
山本真紀：『「共生」に学ぶ』裳華房（2005）
岡崎恵視他：『花の観察学入門』培風館（1999）
金子信博：『土壌生態学入門』東海大学出版会（2007）
日本農芸化学会編：『人に役立つ微生物の話』学術出版センター（2002）
相馬寛吉：『太古のなぞを解く』岩波書店（1973）
小島郁生：『恐竜はなぜ滅んだか』岩波書店（1984）
石川良輔：『昆虫の誕生』中公新書（1996）
倉谷滋：『個体発生は進化を繰り返すのか』岩波書店（2005）

人類関係

- 宝来聰：『DNA人類進化学』岩波書店（1997）
海部陽介：『人類がたどってきた道』NHK出版（2005）
酒井邦嘉：『言語の脳科学』中公新書（2002）

Life and the Earth II

Kazuhiro Satoh

Abstract

Recent progress in science (planet science, earth science, geophysics, molecular biology, embryology, and so on) makes possible to reveal the basic processes of evolution of life. Scientists believe that life can be understood on the physical and chemical laws. They also recognize that the global environmental changes of the earth strongly affect the history of life. However, many unanswered questions are remained as yet. We will discuss in this paper the reason why the remarkable diversity of life is acquired for last 600 million years. The first key concept is the strategy of plants and animals in order to expand their niche from ocean to land. It is also pointed out that the second key concept is "syntbiosis" which occurred in various level of life, such as genetic, cellular, and individual organisms.